

南京不同功能区大气降尘速率及其影响因素分析^①

李山泉^{1,2}, 李德成¹, 张甘霖^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对南京 6 个功能区 2005—2008 年间大气降尘特征及城市人为因素和气象环境因子研究表明, 受人为影响较小的背景区域的大气背景降尘量较低且多年较稳定, 但春季受西北地区沙尘传播影响而显著高于其他季节; 大气降尘量在各功能区之间存在显著的差异, 其基本趋势是: 背景区最低, 工业区显著高于交通干道和居民区; 居民区和城郊区大气降尘受城市人为活动影响较小, 其年季变化与背景区类似, 随相对湿度增加而显著降低; 工业/居民混合区和工业区的人为近源影响较大, 降尘与气象因子的相关性较复杂, 受降雨洗尘影响较大; 交通干道的降尘与气象因素相关关系最弱, 工业区降尘与降雨量呈显著负相关。

关键词: 大气降尘; 气象因子; 功能区; 南京

中图分类号: P445+.4

大气降尘是空气中的悬浮颗粒物在重力作用下以干、湿沉降方式从大气自然沉降在地表上的颗粒物。大气降尘作为全球重要的环境过程, 对陆地和海洋生态系统存在重要影响^[1-2], 如给贫瘠生态系统输入养分离子, 并可改变土壤组成和性质^[3], 提供海洋浮游植物所需的铁元素^[4], 但工业区域的降尘由于含有污染物质如重金属和难降解有机物等而对土壤和地表水环境造成污染^[3, 5]。

作为城市大气环境监测的重要内容之一, 部分国家和地区制定了当地降尘环境标准, 清洁标准值从 5.25 ~ 10 g/(m²·month) 不等^[6]。我国国家环保部也于 1986 年制订的《环境监测技术规范》(第二册)大气和废气部分中将降尘量列为必测项目, 并在《环境质量报告书编写技术规范》中根据自然和人文条件的差异提出了指导降尘量评价标准的建议^[7]。

对不同城市范围内大气降尘的物质组成、粒径特征和来源的研究较多^[8], 部分研究也探讨了气象因素(气压、蒸发量、气温、降雨量、降雨日数、相对湿度、风速和风向等)对大气降尘的影响, 得出的结论因区域环境的差异而不同^[9-12]。作为环境监测项目, 南京市环境监测中心站对南京例行监测点和背景点 2004—2006 年^[13]和 2000—2009 年^[14]大气降尘的分析认为全市总体降尘呈下降趋势, 春季降尘量最高, 受

局地大气颗粒物排放影响较大。倪刘建等^[15]和黄顺生等^[16]分别研究了南京不同功能区 2005 年 1—12 月和 2006 年 12 月—2007 年 12 月大气降尘的物质组成特征, 获得了大气降尘的污染特征与物源解析。钱凌等^[17]从粒径分布特征对南京北郊 2007 年 7—12 月大气细颗粒物的研究分析了人为活动和气象条件对大气颗粒物浓度的影响。

但上述研究对大气降尘或是对大气降尘的影响因素讨论较少, 或是研究期间较短, 缺乏年度重复性, 对人为活动背景影响下城市大气降尘的区域分异及其影响从人为和自然条件的综合影响方面也还缺少系统的研究。南京是我国东部受亚洲沙尘活动影响边缘区的工业城市, 对城市大气降尘污染特征与变化以及主要影响因子的研究是否应综合分析大的区域大气背景特征和城市局地各类下界面影响^[18]。如能针对不同功能区、不同季节降尘特点作长期连续研究, 结合环境因子分析, 将可全面地了解区域降尘特征及其影响因素, 对分区域采取不同的具有针对性的环境管理措施控制/减少大气降尘具有重要的意义。故本文从城市典型功能区出发, 对南京多年大气降尘特征和环境因子进行分析, 研究区域背景降尘、城市活动和气象因子对大气降尘的影响, 为制订有效的减轻降尘污染和改善城市环境质量提供科学基础和指导。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41071142, 41071141)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-405-1)资助。

* 通讯作者(glzhang@issas.ac.cn)

作者简介: 李山泉(1983—), 男, 重庆万州人, 博士研究生, 主要从事土壤环境研究。E-mail: sqli@issas.ac.cn

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

南京是中国华东区域中心城市,主城区建于秦淮河与长江共同作用形成的河漫滩上,平均海拔 7~10 m,市区面积 4 844 km²,人口 534 万,以商业和居民区为主。四周低山丘陵起伏,占全市土地总面积的 64.5%,最高峰为城市东郊的紫金山 450 m。属北亚热带季风气候区,年均气温 15.3℃,年均降雨量 1 106.5 mm,冬夏季风转换十分明显,冬春(12月—5月)以西北风为主,弱冷高压控制下的冬季易发生城市空气重污染;夏秋(6月—11月)东南风为主导,降雨充沛,占全年降雨量的 70% 以上,雨量集中的夏季可超 50%。南京也是重要的综合性工业基地,以电子、钢铁、化工和汽车为主导产业,工业布局呈三大区域:城东南郊包括梅山化工园和秦淮科技园的城南工业区,东北部毗邻的城北工业区有金陵石化化工园和热电厂,长江北岸以扬子石化工业区为主的江北工业区距主城区 15 km。

1.2 采样与分析

选择南京大气环境的传统清洁监测点^[13]的城东郊紫金山森林风景区(FA,地点位于紫金山天文台,海拔 250 m)作为背景监测点,以居民区(RZ,地点位于公教一村,海拔 15 m)、城郊区(SUB,地点位于江苏省农科院,海拔 23 m)、交通干道(TR,位于北京东路梅园段,海拔 7 m)、工业/居民混合区(IR,地点位于南京钢铁厂办公区,海拔 38 m)和工业区(IN,地点位于梅山钢铁厂冶炼区,海拔 38 m)5 类城市功能区作为受人为活动影响的监测点(图 1)。

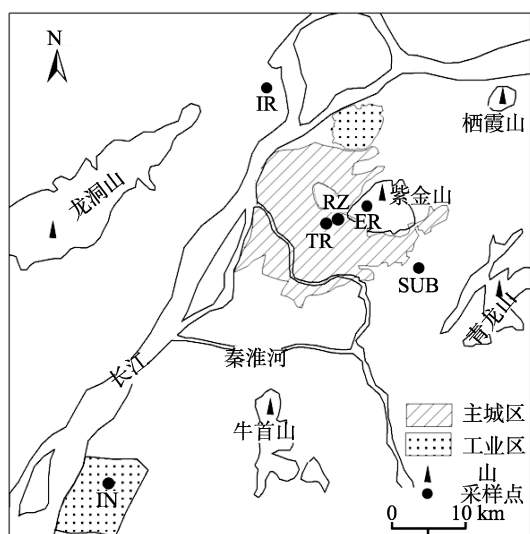


图1 采样监测点示意图

Fig. 1 Diagram of dustfall sampling sites

大气降尘的采集方法根据取样器介质分为干法与湿法两种^[19],干法以玻璃珠作取样介质简单廉价而在国外较常用^[20],湿法的液体介质能捕获任何与之接触的大气颗粒物,该法收集的大气降尘量大于其他方法^[7]。本研究采用干法收集大气降尘:从 2005 年 1 月到 2008 年 12 月逐月以内径 15 cm、高 30 cm 的降尘缸用玻璃珠介质收集大气降尘^[20]。参照国家有关标准中的降尘采集方法^[21],将降尘缸置于距地面一定高度的固定平台上,确保桶口高于平台 150 cm,内衬一次性清洁塑料袋,在袋中平铺一层直径 1.2 cm 并经酸浸泡清洗的玻璃珠以防收集的降尘飞溅损失。每个月收集一次大气降尘,去除树叶、昆虫等异物后,用 200 ml 蒸馏水将袋中的降尘冲洗到烧杯中,于 80℃ 温度蒸至近干,然后转移至聚乙烯坩埚中,置于烘箱中在 105℃ 下烘干后称重,获取每月大气降尘量。本研究去除在居民区和交通干道监测点因城建筑施工损坏的 10 个样品外,共收集有效的大气降尘样 278 个。

同期气象数据来自中国气象科学数据共享服务网的中国地面国际交换站气候资料日值数据集南京站(32°00'N, 118°48'E, 海拔 7.1 m, 2008 年移至新址 31°56'N、118°54'E, 36.8 m)逐月上报的《地面气象记录月报表》,获得的气象资料包括月平均气压、温度、相对湿度、降雨量、雨日数、风速、月最大风速、各风向频率和各风速频率。采用 SPSS 软件对大气降尘进行统计分析 with 差异显著性比较(Duncan's 检验, $P < 0.05$ 水平),并与气象因子作相关分析。

2 结果与讨论

2.1 背景大气降尘特征

图 2 为 4 年期间南京市背景区逐月大气降尘统计分布,研究期间背景区的大气降尘速率范围为 2.51~14.02 g/(m²·month),平均为 5.53 g/(m²·month)。48 个月份中,75% 的月份大气降尘速率小于 5.76 g/(m²·month),稍低于张群等^[13]和郁晶等^[14]采用湿沉降法获取的南京大气降尘背景值,这是由于本研究采用的玻璃珠法(干沉降法)收集降尘,而干沉降法获取的大气降尘一般要低于湿沉降法^[19]。背景区 2005—2008 4 个年份月均大气降尘速率分别为 5.89、5.46、5.25、5.28 g/(m²·month),年际差异统计检验不显著(图 3),由图 2 也可见研究期间年大气降尘速率的月变化趋势相同,这表明设置的监测点可以指示南京区域的背景大气降尘。

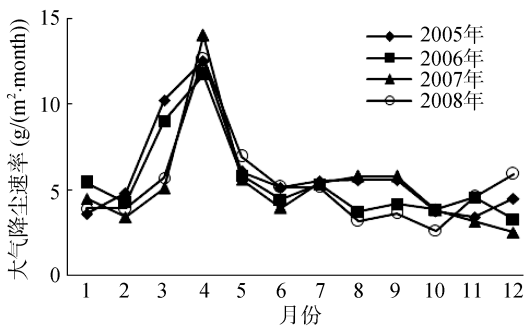
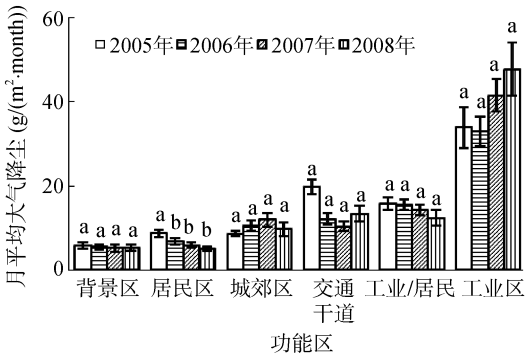


图 2 2005—2008 年南京市背景区大气降尘速率月份变化
Fig. 2 Monthly dustfall in background area from 2005 to 2008 in Nanjing



(图中小写字母不同表示同一功能区不同年份间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平)

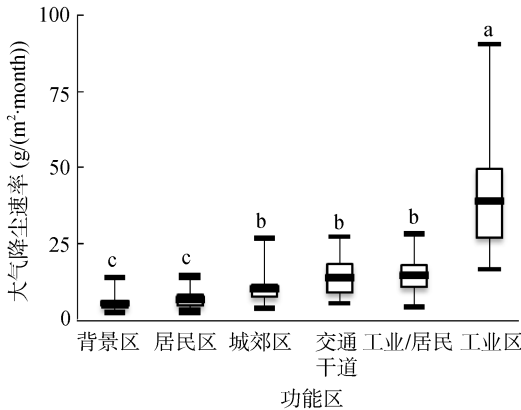
图 3 南京不同功能区降尘速率的年降尘变化
Fig. 3 Annual dustfalls in various functional zones

由图 2 也可以看出,南京大气降尘从 3 月开始增加,到 4 月达到最大,随后开始降低;春季(3、4、5 月)大气降尘速率平均为 $8.90 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$,大致是夏、秋和冬 3 个季节的两倍;而夏、秋和冬 3 个季节各月的降尘分别为 5.00 、 4.22 和 $4.02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$,其变化和差异均较小。

2.2 不同功能区大气降尘特征

各功能区月大气降尘速率最小值、最大值和 25% 与 75% 频率统计分布见图 4。图 4 表明:大气降尘由低至高依次为背景区<居民区<<城郊区<

交通干道<工业/居民混合区<<工业区,4 年平均大气降尘速率分别为 5.53 、 6.66 、 10.22 、 13.99 、 14.58 和 $38.95 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$; 居民区虽然略高于背景区,但两者之间差异并不显著;城郊区、交通干道和工业/居民混合区虽然均显著高于背景区和城郊区,但三者之间没有显著差异;工业区值最高,显著高于其他功能区。



(图中小写字母不同表示不同功能区差异达到 $P < 0.05$ 显著水平)

图 4 南京不同功能区降尘速率
Fig. 4 Dustfalls in various functional zones

最大降尘速率发生在工业区为 $90.80 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$ (2008 年 9 月),最小出现在清洁区 $2.51 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$ (2007 年 12 月)。除居民区大气降尘速率 2005 年显著高于其他年份外(推测这与 2005 年公教一村内新的建筑活动有关,兴建台城健身中心),其他各功能区大气降尘速率的年际之间差异较小,均没有达到显著水平(图 3)。

大气降尘的季节变化在不同功能区表现出一定的差异(表 1): 居民区和城郊区降尘在春季显著高于其他季节,其他季节间差异不显著; 交通干道春季降尘显著高于夏、冬季,秋季最低; 工业/居民混合区降尘冬季显著低于其他 3 个季节; 工业区降尘夏季显著低于其他季节(原因可能是南京夏季工业限电的生产活动减少,导致人为排放降低)。

表 1 不同功能区大气降尘近源贡献
Table 1 Contribution rates of near-source to dustfall in various functional zones

季节	背景区		居民区		城郊区		交通干道		工业/居民		工业区	
	降尘速率	近源贡献率 (%)	降尘速率	近源贡献率 (%)	降尘速率	近源贡献率 (%)	降尘速率	近源贡献率 (%)	降尘速率	近源贡献率 (%)	降尘速率	近源贡献率 (%)
春	8.90 a	6.95	9.56 a	6.95	15.94 a	44.19	17.41 a	48.91	15.76 ab	43.57	41.31 a	78.46
夏	4.98 b	26.68	6.79 b	26.68	9.51 b	47.69	13.63 ab	63.48	17.93 a	72.25	26.03 b	80.88
秋	4.22 b	22.38	5.44 b	22.38	8.69 b	51.39	12.42 b	66.00	15.27 abc	72.34	43.88 a	90.38
冬	4.02 b	23.17	5.23 b	23.17	7.09 b	43.27	13.90 ab	71.06	11.26 c	64.28	41.99 a	90.42
全年	5.53	16.97	6.66	16.97	10.22	45.90	13.99	60.47	14.58	62.06	38.95	85.80

注:降尘速率单位: $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$; 同列数据小写字母不同表示同一功能区不同季节间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。

参考降尘评价标准,以秦岭淮河以南城市为清洁区实测值加 $3\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{month})^{[22]}$,工业区降尘各月达标率 0,多年平均超标 361.7%;工业/居民混合区和交通干道各月达标率分别为 9.8% 和 12.5%,多年平均分别超标 64.8% 和 72.1%;城郊区各月达标率 31.3%,多年平均超标 20.7%;居民区各月达标率 82.2%,多年平均控制在标准之内。

2.3 不同功能区城市活动对大气降尘的影响

大气降尘受区域背景大气气溶胶与地表排放源产生的大气颗粒物质的影响,表 1 也反映了不同功能区城市活动对大气降尘的近源贡献,其值的获取是通过比较不同功能区大气降尘相对背景降尘增加的百分比。可以看出:工业区大气降尘受近源影响最大,近源活动对大气降尘的贡献达 85.80%,工业/居民混合区和交通干道的近源贡献率分别为 62.06% 与 60.47%,这 3 个功能区大气降尘速率变化与背景区无显著的相关关系,相关系数 r 分别为 0.02、0.28($n=48$)和 0.37($n=41$),受区域大气背景沉降影响较小,可以认为是功能区近源大气颗粒物排放源主导了大气降尘过程。居民区和城郊区大气降尘的近源贡献率分别为 16.97% 和 45.90%,小于 50%。这两功能区与背景区降尘变化趋势相近,相关系数 r 分别为 0.66**($n=45$)和 0.72**($n=48$),表明这两类区域受近源城市活动影响较小,大气降尘主要受区域背景降尘

影响。各功能区城市活动的近源贡献率在春季都最低,这是由于春季是北方沙尘远源物质输入最强的季节,这导致了背景大气降尘增强,在一定程度上掩盖了近源的影响(表 1)。

2.4 气象因素对不同功能区大气降尘的影响

表 2 反映了各功能区逐月降尘速率与各气象要素之间的关系:背景区、居民区和城郊区的降尘速率与相对湿度之间呈极显著的负相关,背景区大气降尘也与最大风速显著正相关,城郊区大气降尘还与气压成显著负相关,与张国宏等^[10]在上海的研究结论一致;交通干道与各气象因子均无相关性;工业/居民混合区与气压、温度、降雨量和雨日数均有极显著的相关性;工业区降尘只与降雨量呈显著负相关。

逐月大气降尘速率与当月各风速频率的相关分析见表 3,背景区、居民区和城郊区降尘与月均 2~3 m/s 风速频率均为显著正相关,表明此级别风速下有利于颗粒物质的下降。而更小的静风下虽然有利于大气颗粒物的沉降,在空气污染严重的工业区大气中颗粒物较多的条件下与降尘呈正相关,但在其他大气中颗粒物较少的区域都不利于起尘,与降尘呈负相关;大于 3 m/s 的风速可导致大气颗粒物运移,使得降尘速率降低。但在背景区,降尘需从异地运移,在大于 5 m/s 风速下有利颗粒物的传输,降尘与该风速频率呈正相

表 2 大气降尘速率与气象要素相关系数
Table 2 Contribution rates of near-source to dustfall in various functional zones

功能区	气压	温度	相对湿度	降雨量	雨日数	平均风速	最大风速
背景区	-0.16	0.06	-0.53**	0.06	-0.01	0.21	0.31*
居民区	-0.15	0.08	-0.59**	0.07	0.09	-0.05	0.03
城郊区	-0.29*	0.22	-0.39**	-0.03	-0.11	0.07	0.18
交通干道	0.02	-0.13	-0.38	0.04	0.17	0.18	0.17
工业/居民	-0.47**	0.47**	0.18	0.43**	0.45**	0.05	0.07
工业区	0.22	-0.21	0.14	-0.30*	-0.19	0.21	0.17

注:**表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平,*表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平,下表同。

表 3 大气降尘速率与各风速频率相关系数
Table 3 Correlation coefficients between dustfall and frequency of wind-speed

功能区	风速 (m/s)						
	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	>6
背景区	-0.31*	-0.08	0.31*	-0.03	0.03	0.21	0.28
居民区	-0.27	0.13	0.33*	-0.14	-0.17	-0.11	-0.12
城郊区	-0.22	-0.02	0.32*	-0.05	-0.05	-0.05	-0.02
交通干道	-0.27	-0.07	0.08	0.25	0.11	0.08	-0.03
工业/居民	-0.08	-0.05	0.11	0.10	-0.04	-0.03	-0.02
工业区	0.16	-0.29*	-0.17	0.08	0.41**	0.26	0.23

关。交通干道和工业/居民混合区受近源影响较复杂,与各风速频率没有显著的相关性。工业区由于近源活动强烈,随风速增大地面扬尘增多,降尘与 4~5 m/s 风速频率呈极显著正相关。

月降尘速率与当月各风向频率的相关分析见图 5,背景区和降尘速率呈正相关的方位为 SSE~W 的扇形区域,其中与 SW 方向相关系数超过 0.01 的信度检验,表明区域背景降尘受南京城区产生的大气颗粒物传输的影响。居民区由于受背景大气降尘影响较大,与背景区受风向频率影响的相关系数也相似,但

由于居民区的监测点相对背景区而言位于城区,因此受从城区方向的风向影响更大,SW 方向的相关系数较背景区大。城郊区由于北面紫金山森林的影响,和降尘呈正相关的风向为 ESE~SW 的偏南扇形区域。交通干道降尘量与各方向的风向频率的相关系数均低,大区域风向对该地点的降尘影响不明显。工业/居民混合区和工业区降尘与各风向频率的相关系数因监测点所处位置与区域主要排放源区的相对方位而与该位置方向的相反风向具有较高的相关性。

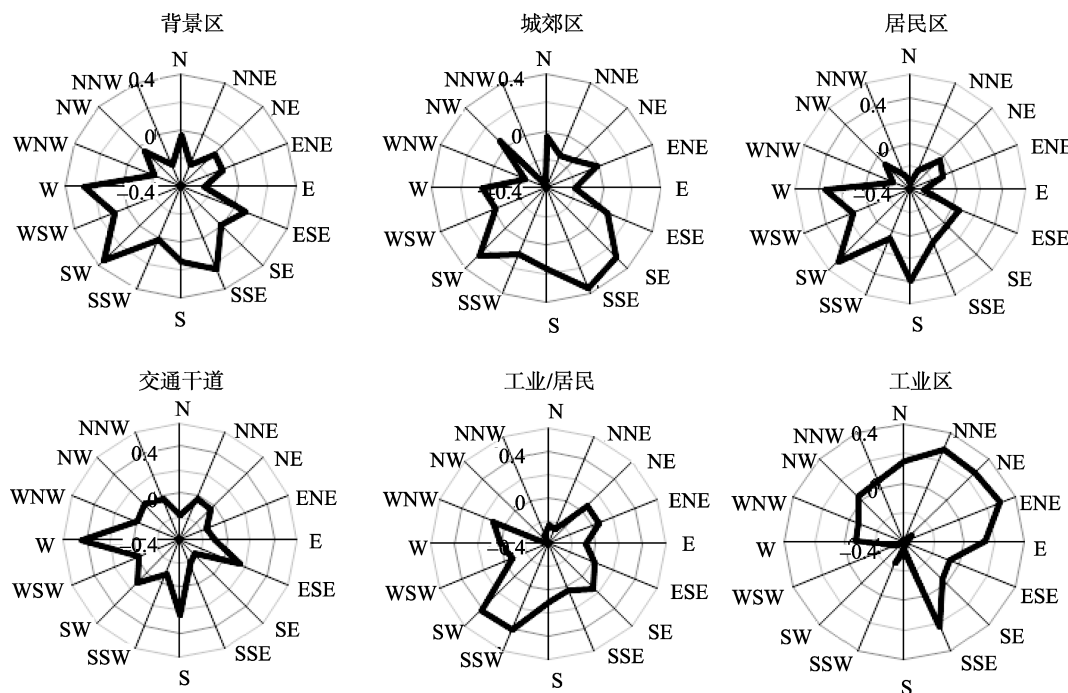


图 5 大气降尘与风向频率相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients between dustfall and frequency of wind-direction

2.5 讨论

相比较于国内其他城市,南京大气降尘背景值远低于乌鲁木齐^[23]、兰州^[24]、西安^[25]和太原^[26]等西北城市,低于北京^[27]、马鞍山^[28]、徐州^[29]和淮阴^[30]等城市,而与上海^[31]和韶关^[32]相近(图 6);全市各区域大气降尘速率的均值为 15.11 g/(m²·month),低于乌鲁木齐、兰州、西安、太原等北方城市,与周边上海、马鞍山、徐州、淮阴接近,但高于南方城市广州^[33]。造成这一差异的主要原因在于各城市与东亚沙尘的源区中国西北塔克拉玛干沙漠和北部与蒙古南部的戈壁沙漠之间的空间距离。据研究,东亚沙尘源区每年有 800 Tg 的沙尘在大气作用下向中国东部、日本,甚至北太平洋区域传输^[34], Zhang 和 Gao^[35]、张德二和孙霞^[36]以及李徐生等^[37]的研究都表明南京也受东亚沙尘的影响。鉴于春季是中国北方沙尘

暴活动的高发期^[38],南京背景区春季异常高的大气降尘速率表明了北方沙尘活动导致的远源物质输入,并主导了南京受人为影响较弱的区域的春季降尘过程。

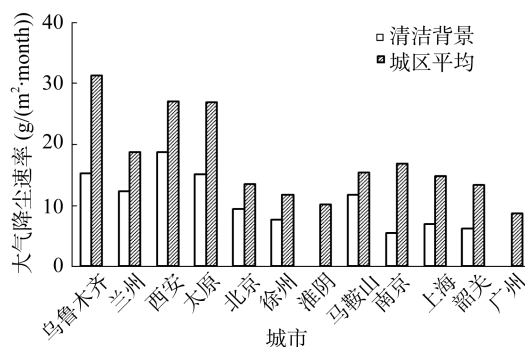


图 6 不同城市大气降尘速率比较

Fig. 6 Comparison of monthly dustfalls between various cities

城市活动导致大气降尘在各功能区相对于大气背景降尘增加,张群等^[13]和郁晶等^[14]对南京的研究同样认为局地大气颗粒物的人为排放增加了大气降尘量。人为影响的加剧改变了不同功能区大气降尘特征,削弱了其与大背景降尘的相关性。

大气降尘与气象因素之间的关系较复杂,现有的研究也因地点资料不同而产生不同的结论^[9-12]。总体上看,气压高不利于颗粒物质的产生,会减少降尘。温度升高既可增加大气紊度,易起尘可导致大气降尘量的增加。相对湿度、降雨量和雨日数既能净化大气从而降低降尘量,也可将空气中颗粒物淋洗加快降尘过程增加降尘量,具体影响需从不同区域大气颗粒物排放特征进行分析。风对降尘影响最重要,风速既可影响不同粒径的大气颗粒物的产生和沉降,也同风向一起影响大气颗粒物的传输。在人为排放较少的区域(背景区、城郊区和居民区),相对湿度的增加不利于起尘,可显著降低大气降尘量。背景区降尘物质多为大气运移异地来源,受风速和最大风速的影响较大。而在人为影响较大的区域大气降尘的气象影响因素复杂。降雨量、雨日数等降水因子的提高既可在工业/居民混合区对空气的淋洗加快降尘,也可与在工业区的洗尘作用不利于起尘而降低大气降尘量。交通干道的大气降尘主要受汽车排放和二次扬尘影响,与气象条件的影响没有明显的关系。

虽然从周边环境与局地区域大气颗粒物排放差异的研究揭示了人为活动和各自然气象因素对大气降尘的影响,但是降尘量和气象要素之间的关系并非线性可加和的,大气降尘速率受多重因素的影响,是一个复杂的动态过程,欲定量区分各要素对降尘速率的影响较困难,仍需要在环境大气污染排放控制方面进行更深入的研究与探讨。

3 结论

(1) 南京背景大气降尘速率较低,各功能区大气降尘速率年际之间差异不显著,北方远源沙尘物质的输入导致背景区、居民区、城郊区和交通干道的大气降尘在春季均高于其他季节,但工业/居民混合区和工业区大气降尘最大速率则出现在冬季。

(2) 居民区和城郊区降尘过程受大气背景影响较大,但交通干道、工业/居民区、工业区大气降尘受城市活动影响的近源贡献出现增大趋势,春季北方沙尘影响增加了区域大气背景降尘,从而降低了各功能区大气降尘的近源贡献率。

(3) 气象因素对背景区、居民区和城郊区的大气降尘的影响相似,相对湿度的增加使得大气降尘速率

显著降低;交通干道大气降尘与气象因子没有明显的关系;工业/居民混合区降尘与气象要素的相关性较复杂;工业区降尘受降雨量的影响明显。

(4) 2~3 m/s 的风速可增加背景区、居民区和城郊区的大气降尘速率,大于 5 m/s 的风速导致背景区降尘速率的增大。SW 风向会增大背景区和居民区的降尘速率。城东郊因紫金山影响大气降尘受偏南向风影响较大,而工业/居民混合区和工业区降尘速率以监测点对附近排放源的方位而受相反的风向影响明显。

参考文献:

- [1] Derry LA, Chadwick OA. Contributions from earth's atmosphere to soil[J]. *Elements*, 2007, 3(5): 333-338
- [2] Corry RL, Jason CN. The contemporary physical and chemical flux of aeolian dust: A synthesis of direct measurements of dust deposition[J]. *Chemical Geology*, 2009, 267(1): 46-63
- [3] Moon HB, Lee SJ, Choi HG, Ok G. Atmospheric deposition of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs) and dibenzofurans (PCDFs) in urban and suburban areas of Korea[J]. *Chemosphere*, 2005, 58(11): 1 525-1 534
- [4] Martin JH, Fitzwater SE. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic[J]. *Nature*, 1988, 331: 341-343
- [5] Wong CSC, Li XD, Zhang G, Qi SH, Peng XZ. Atmospheric deposition of heavy metals in the Pearl River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(6): 767-776
- [6] Vallack HW, Shillito DE. Suggested guidelines for deposited ambient dust[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(16): 2 737-2 744
- [7] 王赞红. 大气降尘监测研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(1): 54-59
- [8] Wu YS, Fang GC, Lee WJ, Lee JF, Chang CC, Lee CZ. A review of atmospheric fine particulate matter and its associated trace metal pollutants in Asian countries during period 1995—2005[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(1): 511-515
- [9] 樊恒文, 肖洪浪, 段争虎, 李新荣, 李涛, 李金贵. 中国沙漠地区降尘特征与影响因素分析[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(6): 559-565
- [10] 李明香, 任成. 应用灰色关联分析法研究气象因子对大气降尘的影响程度[J]. *气象与环境学报*, 1997, 14(1): 26-28
- [11] 谭洪恩, 陈春梅, 肖艳阳. 石河子市自然降尘、硫酸盐化速率与气象因子的相关分析[J]. *新疆环境保护*, 1998, 20(3): 34-36
- [12] 张国宏, 谈建国, 郑有飞, 魏海萍, 阴俊. 上海市月降尘量与气象因子间关系研究[J]. *气象科学*, 2006, 26(3): 328-333
- [13] 张群, 傅寅, 张予燕, 闻欣. 浅析南京市大气降尘规律[J]. *环境科学与管理*, 2009, 34(4): 68-71

- [14] 郁晶, 张群, 喻义勇, 徐荣. 南京市近十年降尘趋势分析[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(12): 33–37
- [15] 倪刘建, 张甘霖, 阮心玲, 赵文君, 杨金玲, 周立祥. 南京市不同功能区大气降尘的沉降同量及污染特征[J]. 中国环境科学, 2007, 27(10): 2–6
- [16] 黄顺生, 华明, 金洋, 吴新民, 廖启林, 朱佰万, 潘永敏. 南京市大气降尘重金属含量特征及来源研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 161–166
- [17] 钱凌, 银燕, 董尧青, 王巍巍, 魏玉香. 南京北郊大气细颗粒物的粒径分布特征[J]. 中国环境科学, 2008, 28(1): 18–22
- [18] Hewitt CN, Jackson A. Handbook of Atmospheric Science, Principles and Applications[M]. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 2003: 256
- [19] 钱广强, 董治宝. 大气降尘收集方法及相关问题研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 779–782
- [20] Ganor E, Foner HA, Gravenhorst G. The amount and nature of dustfall on Lake Kinneret (the Sea of Galilee), Israel: Flux and fractionation[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(30): 4 301–4 315
- [21] 国家环境保护局. 中华人民共和国国家标准环境空气降尘的测定重量法(GB/T 15265-1994) [S]. 北京: 中国标准出版社
- [22] 国家环境保护局. 环境质量报告书编写技术规定[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991
- [23] 窦毅举, 韩龙生, 石振原. 乌鲁木齐大气降尘的影响因素研究[J]. 大气环境, 1989, 4(1): 17–22
- [24] 张宁, 牛耘, 李春生. 兰州市大气降尘沉积物的粒度分布特征研究[J]. 干旱环境监测, 1998, 12(1): 15–19, 31
- [25] 董小林, 曹广华. 大气降尘污染引起城市供水增加的污染率计量模型[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(10): 761–763
- [26] 张乃明. 大气沉降对土壤重金属累积的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 91–93
- [27] 郭婧, 徐谦, 荆红卫, 王文盛, 皮征陵. 北京市近年来大气降尘变化规律及趋势[J]. 中国环境监测, 2006, 22(4): 49–52
- [28] 李玲, 汪立河. 城市大气降尘污染特征分析及对策[J]. 福建环境, 2002, 19(3): 12–13, 18
- [29] 李昌平, 李月娥, 余童. 徐州市近年来大气降尘变化规律及趋势[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6): 40–44
- [30] 韩静. 淮阴区大气降尘污染状况探讨[J]. 江苏环境科技, 2006, 19(Z2): 79–80
- [31] 刘鹂, 严静芬. 吴淞工业区大气降尘变化规律及趋势[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(6): 90–93
- [32] 罗莹华, 戴塔根, 梁凯. 广东韶关市大气降尘及尘中金属元素分布特征研究[J]. 地质调查与研究, 2006, 29(1): 64–68
- [33] 陈煜辉, 胡丹心. 广州市近 10a 降尘污染趋势分析[J]. 广州环境科学, 2002, 17(4): 11–14
- [34] Sun JM, Zhang MY, Liu TS. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960–1999: relations to source area and climate[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D10): 325–334
- [35] Zhang K, Gao HW. The Characteristics of Asian-dust storms during 2000–2002: From the source to the sea[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(39): 9 136–9 145
- [36] 张德二, 孙霞. 我国历史时期降尘记录南界的变动及其对北方干旱气候的推断[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 1–8
- [37] 李徐生, 韩志勇, 陈英勇, 蔡元峰, 杨达源. 2006 年 3 月 11 日南京“泥雨”降尘特征及其粉尘来源[J]. 第四纪研究, 2009, 29(1): 43–55
- [38] Sun L, Zhou XK, Lu JT, Kim YP, Chuang YS. Climatology, trend analysis and prediction of sandstorm and their associated dustfall in China[J]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2003, 3(2): 41–50

Atmospheric Dustfall Rates in Various Functional Zones of Nanjing and Its Influential Factors

LI Shan-quan^{1,2}, LI De-cheng¹, ZHANG Gan-lin^{1*}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Four years' dustfall at six functional zones in Nanjing and meteorological factors, along with the human impacts were studied in this article. Results showed that the background dustfall in the weak anthropogenic-impacted site was constant and at low levels. Due to the long-range transported Asian dust, the background dustfall in spring season was two times higher than in other seasons. The difference of dustfall among functional zones was significant, lowest at background site, and highest at industrial zones. Because the anthropogenic impact was relatively weak, the temporal variation of dustfall and meteorological influence at residential zone and suburban were similar to that at background site. Dustfall were all significantly reduced by the humidity. The anthropogenic impact on dustfall at industrial and residential mixture zone and industrial zone was heavy, making the influence of meteorology was complicated, and rain was an important factor there. No clear relationship between dustfall and meteorological factors was founded at traffic belt.

Key words: Dustfall, Meteorological factors, Functional zone, Nanjing